

低励失磁微机保护的研究

清华大学电机系 张学深 卜秉鑫 王维俭

摘要 本文简要分析了失磁微机保护的原理和方案, 提出和分析了平均功率算法和转子电压补偿方法。它具有简单明了、选择性好、可靠性高等优点。经动模实验证明性能优良。

关键词 失磁保护 平均功率 转子电压补偿。

低励失磁是发电机最常见的故障形式之一。目前我国现场运行和新研制的保护装置中, 广泛采用静稳极限判据, 一种是定子阻抗判据, 一种是转子电压随有功变判据, 即 $U_{fd}(P)$ 判据。第一种方案是通过测量机端阻抗间接地反映低励失磁故障, 它受系统的运行方式、状态的影响, 在外部短路、系统振荡时都存在误动的可能, 此外在长线充电、自同期过程和电压回路断线时也会引起误动作。为保证选择性, 必须附加许多辅助判据, 如: 短路和振荡闭锁、PT断线闭锁、延时等, 使失磁保护装置复杂化。此外, 动作时间较慢也是一个问题。随着大规模集成电路和微处理机的出现, 第二种方案越来越引起人们的注意, 因为它在选择性和检测故障的快速性上都优于定子阻抗判据。目前已发表许多以 $U_{fd}(P)$ 为主判据的文章, 研制出多种样机, 有的已在现场运行, 取得了一定成果和经验。但仍存在辅助判据过多, 方案过于复杂, 某些条件下选择性不能令人满意等问题, 尤其在如何躲外部短路和系统振荡这两个较难解决的问题上, 以及对某些励磁调节器, 如文献 [3] 在强行减磁条件下保证不误动的问题上, 还有待于进一步完善。

1 原理及方案

单机对无穷大系统如图 1

发电机稳态输出有功功率为:

$$\text{汽轮发电机: } P = \frac{E_0 U_x}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

$$\text{水轮发电机: } P = \frac{E_0 U_x}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{(x_d - x_q) U_x^2}{2 X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \sin 2\delta \quad (2)$$

式中 $X_{d\Sigma} = X_d + X_s$, $X_{q\Sigma} = X_q + x_s$

x_s 为系统联系电抗 (包括升压变压器)

U_x 为无穷大系统电压, E_0 为空载电势。

设 $P_T = \frac{(x_d - x_q) \cdot U_x^2}{2 \cdot X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \sin 2\delta$ 为凸极功率

$$\text{则水轮发电机可表示为: } P = \frac{E_0 \cdot U_x}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + P_T \quad (3)$$

发电机失磁到达静稳边界的条件为: $\frac{dP}{dt} = 0$ 由此可得汽轮发电机失磁保护的 动作边

$$\text{界为: } P_{jx} = \frac{U_x \cdot E_0 \cdot x}{X_{d\Sigma}} \quad (4)$$

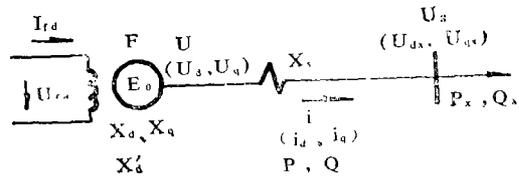


图 1

式中 E_{0jx} 为发电机在静稳边界时的电势。

对水轮发电机的失磁动作边界做线性化处理得：

$$P_{jx} - p_T = \frac{U_x \cdot E_{0jx}}{X_{d\Sigma}} \quad (5)$$

而空载电势 E_0 在不计饱和影响的稳态表达式为： $E_0 = x_{ad} \cdot i_{fd} = x_{ad} \cdot \frac{U_{fd}}{r_{fd}}$

即
$$\frac{E_0}{U_{fd}} = \frac{x_{ad}}{r_{fd}} \quad (6)$$

在同步电机理论中，标么值系统一般分两种：可逆互感系数标么值系统和不可逆互感系数标么值系统〔2〕，后者又叫派克标么值系统，定子侧各参数在两系统中对应相等，转子侧存在如下关系（下标中表示派克标么值系统）：

$$\left. \begin{aligned} x_{ad} \cdot i_{fd} &= i_{fdp} \\ \psi_{adp} &= \frac{x_{ad}}{x_{afd}} \cdot \psi_{fd} \\ U_{fdp} &= \frac{x_{ad}}{r_{fd}} \cdot U_{fd} \end{aligned} \right\} (7)$$

由式（6）（7）得：在派克标么值系统中， $E_0 = U_{fdp}$

则汽轮发电机失磁保护动作边界为：

$$P_{jx} = \frac{U_x}{X_{d\Sigma}} \cdot U_{fdp} \quad (8)$$

（以下仅讨论汽轮发电机情况，水轮发电机同理可得，并省略 U_{fdp} 下标中的p）

在派克标么值系统中转子电压基值为 U_{fd0} 即空载励磁电压，功率基值为 s_e 即额定视功率。将动作边界转变成有名值为： $U_{fd} \leq k_{s.e} \cdot P$ 其中 $k_{s.e} = \frac{X_{d\Sigma} \cdot U_{fd0}}{U_x \cdot s_e}$ 此即失磁保护所采用的主判据。

另有三个辅助判据（参见图2）（a） $U_{fd} < 0.2U_{fd0}$ 经短延时 t_1 发失磁信号，压出在（或切机）。 t_1 可取0.1~0.2s。主判据延时 t_2 可取0.3~0.4s。（b） $U_{3\phi} > 115\%U_e$ 闭锁判据。其中 $U_{3\phi}$ 为机端三相电压。此判据用来闭锁辅助判据1及主判据。并延时 t_3 返回。此判据主要是为防止励磁调节器强行减磁时保护误动而设。 t_3 的整定要视调节器的时间常数和转子绕组时间常数而定，一般可取5~6s。（c） $U_x < 0.8U_{xe}$ U_{xe} 为无穷大母线额定电压。此判据是以系统安全角度出发，当母线电压过低且失磁保护动作时，经延时 t_4 切机。 t_4 取0.2~0.3s框图见图2。

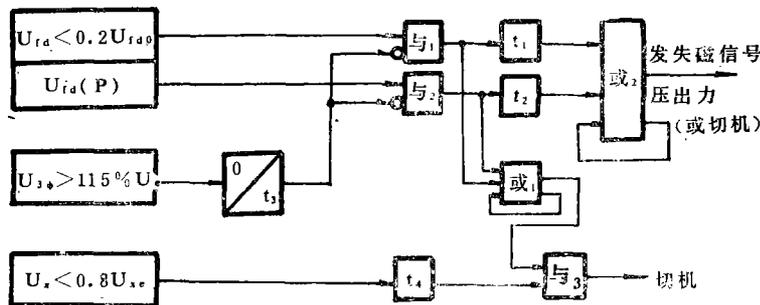


图 2

2 保护算法及分析

本文介绍的失磁保护是大型发变组成套微机保护中一保护功能块中的一个保护，它是在8098单片机上实现的。具体算法如下：

设 t_k 时刻机端电流、电压的采样值分别为 $i_a(k)$ 、 $i_b(k)$ 、 $i_c(k)$ 、 $u_a(k)$ 、 $u_b(k)$ 、 $u_c(k)$ 。转子电压采样值为 $u_{fd}(k)$ 。下列算法表达式中： N —工频下每周波的采样点数。 i —第 i 个周波。 M 、 C —代表工频周期数。 k —采样点序号。

$$\text{功率算法: } P = \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M p_i(k) \right) / M$$

其中 $p_i(k) = i_a(k) \cdot u_a(k) + i_b(k) \cdot u_b(k) + i_c(k) \cdot u_c(k)$ 为三相功率瞬时值。

P 为在 M 个工频周期内对功率求均值

$$\text{转子电压算法: } \begin{cases} U_{fd} = \sum_{k=1}^N u_{fd}(k), & \text{当 } \Delta I < 0 \text{ 时} \\ U_{fd} = \sum_{k=1}^N u_{fd}(k) + U_{fd0} \cdot k_{fd} \cdot \frac{\Delta I}{I_e}; & \text{当 } \Delta I > 0 \text{ 时} \end{cases}$$

其中 $\Delta I = I_i(k) - I_{i-c}(k)$

$$I_i(k) = \sum_{k=1}^N \left(|i_a(k)| + |i_b(k)| + |i_c(k)| \right)$$

即： ΔI 为三相电流平均值与前 C 周波的差分

I_e —为电流额定值， k_{fd} —为补偿系数

$$\begin{aligned} \text{电压算法: } U^2(k) &= \frac{1}{3} \left(u_a^2(k) + u_b^2(k) + u_c^2(k) \right) \\ &= U_{3\phi}^2 \end{aligned}$$

注：在功率和转子电压算法表达式中所差的系数都归算到定值 k_{se} 中。

3 讨论

3.1 失磁保护判据是以静稳极限为边界，而静稳极限只是失磁的充分条件，不是必要条件。这就为准确判别失磁故障带来困难。从有功功率来看，在转子电压不变的情况下， P 增大到一定程度会导致发电机失去静稳；从转子电压来看，由于它通过磁链与定子绕组和系统联系在一起，因此当系统受到扰动时，同样会引起转子电压的波动，如：系统振荡。当这种波动使转子电压幅值低到一定程度时，也会在某段时间内越过静稳边界，引起误动。因此必须对有功功率和转子电压进行加工，以确保选择性。

3.2 在功率算法中运用了在一段时间内求平均值的技术。从物理概念上看，它相当于发电机失磁后的等有功过程的加长。在非失磁工况下，它对有功功率起到了平滑作用，在一定程度上削弱了异常工况下有功功率的波动对失磁判据的影响。尤其是减小了在一定频率范围内的（与 M 值选择有关）系统同步振荡及异步振荡引起失磁保护误动的可能性。 M 值的选取应

能平滑掉系统中可能出现的低频振荡引起的有功功率的波动。如系统中可能出现低频振荡频率为2.5Hz 则有功功率应在0.4s内求平均。

3.3 有功功率取平均值带来的消极后果是增加了异常工况下转子电压波动引起保护误动的几率。如：系统发生短路故障后，故障切除及系统振荡时，引起的转子电压波动。因此还需对转子电压进行适当的补偿。由派克方程（派克标么值系统）可知〔2〕：

$$\psi_{fd} = -(x_d - x'_d) \cdot i_d + i_{fd}$$

$$U_{fd} = \frac{x_{ffd}}{r_f} \cdot P \cdot \psi_{fd} + i_{fd}$$

由上式得知， U_{fd} 的变化是由 $P\psi_{fd}$ 、和 i_{fd} 两部分决定的。在稳态运行时， $P\psi_{fd} = 0$ ， $U_{fd} = i_{fd}$ ，当发生短路故障时，定子电流突然增加，并产生去磁作用，为满足磁链守恒定理，在励磁绕组中将产生相应的直流分量以抵消磁链的变化，并逐渐衰减，励磁绕组在这一暂态过程中，非周期电流分量的变化起主导作用，因此， U_{fd} 将增大；在系统振荡时， ψ_{fd} 将随 i_d 的变化而周期波动，当 i_d 增大时， $P\psi_{fd} < 0$ ，从而导致 U_{fd} 下降，此时 ψ_{fd} 的变化起主导作用。转子电压的补偿正是基于这一原理。它主要用来补偿系统振荡时， U_{fd} 的下降。算法中用 ΔI 近似代替 Δi_d 。其中 k_{fd} 的选取近似等于 $(x_d - x'_d)$ 。由于只在 $\Delta I > 0$ 时进行补偿，所以在非失磁工况下增加了保护的安全性。在失磁故障时，由于初始阶段定子电流变化较小，而且定子电流的变化总要滞后于转子电压的变化，因此，引入补偿后不会影响失磁保护的判别或影响较小。C值的选取要适当，太小补偿效果不明显，太大会影响失磁保护的判别。C值的选取应使差分间隔在 T_d 与 T'_d 之间。

4 动模实验结果

动模实验是在清华大学动模实验室进行的，其原型与模型参数如下：

表 1

	发 电 机				变 压 器 线 路 基 准			
	容 量	电 压	X_d	X'_d	容 量	$U_K\%$	X_s	功 率
原 型	300MVA	18kV	1.67	1.02	300MVA	0.15	0.03	300MVA
模 型	3.516kVA	300V	0.558	0.341	3.516kVA	0.05	0.01	1.25kVA

表 2 发电机失磁故障动作情况 [$U_{fd}(P)$]

满载全失磁（切励磁开关）	动作	图 3
满载部分失磁（掉两相触发脉冲）	动作	图 4
轻载全失磁（切励磁开关）	动作	图 5
轻载部分失磁（掉两相触发脉冲）	动作	图 6
励磁绕组短路	动作	图 7

表 3 异常工况下失磁保护动作情况 $[U_{fd}(P)]$

故障类型		动作情况
变压器高测	K(A, O) 未失步	未动 图 8
	K(A, B) 引起振荡失步	未动 图 9 图10
	K(3, 0) 引起振荡失步	未动 图11 图12
发电机端	K(B, D) 经过渡电阻197Ω	未动
	K(A, O)	未动
	A(3)	未动

动作曲线说明

- a 这些图是根据微机实录数据绘制而成。
- b 实线为相应量补偿后曲线，虚线为相应量未加补偿的曲线。
- c 除图10、图12两图以外，每个图中两实线为实际动作特性，即 $p \cdot k_{set} \geq U_{fd}$ 中的 P 、 U_{fd} 。
- d 纵坐标均为相应量的十进制数。
- e 横坐标均为采样点序号。
- f 图中 U_L 即为 U_{fd} 。
- g 图10、图12为有功功率（未求平均）和转子电压未加补偿的曲线。图9、图11分别为相应补偿后的曲线。

5 结论

- 5.1 由于采用在一段时间内求平均功率的算法，以及对 U_{fd} 进行适当补偿，避免了使用过多的辅助判据及其带来的消极后果，使保护方案简单明了，提高了安全性、选择性，可靠性。
- 5.2 在保证失磁保护可靠性的前提下，较好地防止了由于系统故障切除及振荡引起的保护误动问题。
- 5.3 通过动模实验验证，保护性能良好。

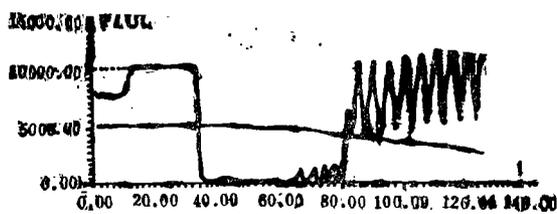


图 3

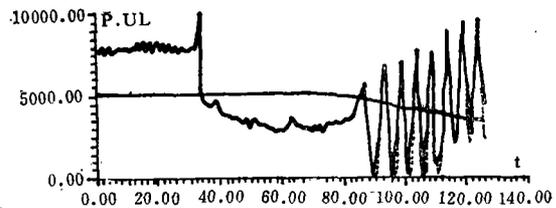


图 4

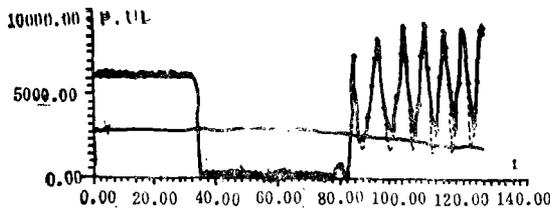


图 5

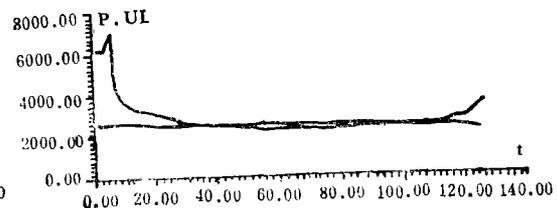


图 6

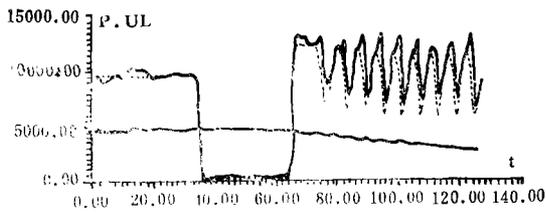


图 7

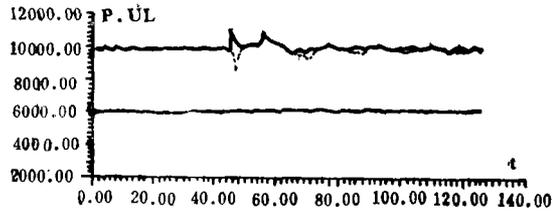


图 8

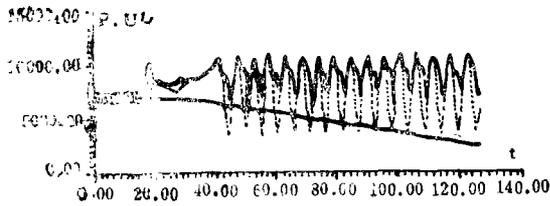


图 9

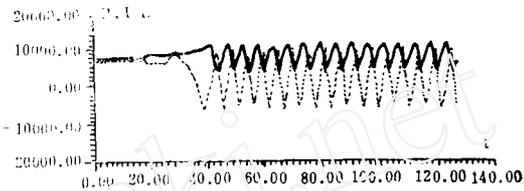


图 10

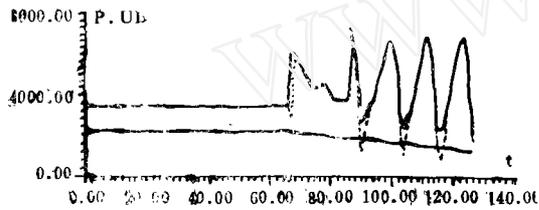


图 11

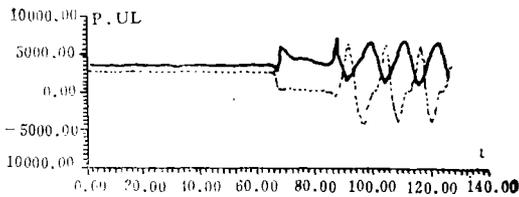


图 12

参 考 文 献

- [1] 王维俭、侯炳蕴编。大型机组继电保护理论基础
- [2] 高景德、张麟征。电机过渡过程的基本理论及分析方法
- [3] 曾 明。大型水轮发电机失磁保护误动分析及对策
- [4] 林韩、姚晴林。U_L(k) 新型微机失磁保护。首届全国青年电力系统学术会议论文集